(19)日本国特許庁（ＪＰ）　　(12) 公開特許公報（A）　　(11)特許出願公開番号

特開平6－270079

(43)公開日　平成6年(1994) 9月27日

(51)Int.Cl.⁵	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
B 2 5 J　9/10	A			
B 0 5 B　12/00	A			
B 2 5 J　13/00	Z			

審査請求　未請求　請求項の数１　ＦＤ（全 7 頁）

(21)出願番号　特願平5－85449

(22)出願日　平成5年(1993) 3月18日

(71)出願人　000002233
株式会社三協精機製作所
長野県諏訪郡下諏訪町5329番地

(72)発明者　伊藤　彰啓
長野県伊那市上の原6100番地　株式会社三協精機製作所伊那工場内

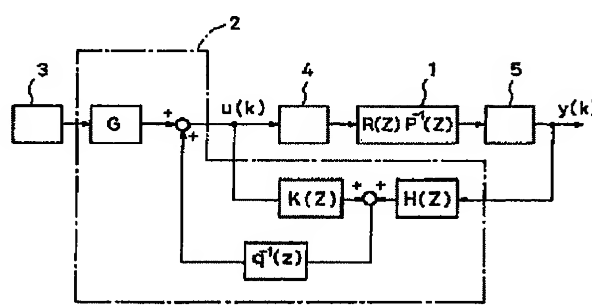
(74)代理人　弁理士　永田　武三郎

(54)【発明の名称】　多関節ロボット制御装置

(57)【要約】

【目的】　簡易で、計算誤差や外乱にも強い実用的な多関節ロボットの非干渉化制御装置を提案することである。

【構成】　ロボット１の伝達関数行列Ｒ（ｚ）Ｐ$^{-1}$（ｚ）は干渉要素をもったものであり、このロボットに対する位置指令信号ｖ（ｋ）、制御入力信号ｕ（ｋ）及び角位置出力信号ｙ（ｋ）は演算装置２に入力される。演算装置２は上記伝達関数行列のロボット１に対し、ｖ（ｋ）からｙ（ｋ）に至る伝達関数行列を干渉要素のない対角なＮ（δ）Ｍ$^{-1}$（δ）に一致させるため、Ｋ（ｚ），Ｈ（ｚ）及びｑ$^{-1}$（ｚ）の各パラメータを予め定めておき、ｖ（ｋ）に対し最適なｕ（ｋ）を算出し出力する。



1

2

【特許請求の範囲】

【請求項１】　所定の位置指令信号に応じて所定の演算装置により算出された制御入力信号により多関節型ロボットを駆動制御し、該ロボットの角位置出力信号を検出するように構成され、前記演算装置は前記位置指令信号から角位置出力信号に至る伝達関数行列が干渉要素のない希望伝達関数行列となるように、所定の制御法則に基づいて前記制御入力信号を算出するようになっていることを特徴とする多関節ロボット制御装置。

【発明の詳細な説明】

【０００１】

【産業上の利用分野】本発明は多関節ロボット制御装置に係り、特に多関節型ロボットのロバストな非干渉化制御装置に関する。

【０００２】

【従来の技術】スカラ型ロボットのような多関節ロボットの場合、通常の各軸の慣性力や摩擦力のほかに、各軸間に慣性干渉力やコリオリ力・遠心力などが働いている。このような相互干渉力があると、ある軸だけに対する指令が他の軸の出力にも影響を与えるため、本来望まない応答が現われることになる。特に慣性干渉力は加速度に依存するので、停止時のオーバーシュートやタクトに悪い影響を与える。

【０００３】従来は各軸の駆動装置が高減速比でその影響が弱められ、これらの干渉力は「その他外乱」として積分補償のみですませ、構造の簡単な各軸ごとのＰＩサーボ系を構成するのが一般的であった。しかし、年々ロボットの動作性能に対する要求が高まって、アームスピードは増加し、タクトも従来の半分以下というレベルになってきている。このような要求に対し、ＰＩ制御では補償しきれないダイナミクスの影響や、高減速比駆動であっても干渉力などの影響が無視できなくなる。

【０００４】これに対し、最近、外乱推定によるロバスト制御が注目されている。これは外乱推定オブザーバにより外乱を補償した後、その補償後の系に対して、状態（速度）オブザーバを付けて制御系を構成するもので、演算量も多い。また、外乱としてステップ状外乱を想定しているため、過渡的な応答には偏差が大きくなるということには変わりはない。さらに制度を向上するためには、ダイレクトドライブ方式が有利であるが、そのときはこのような外乱の影響は非常に大きなものとなり、もっと積極的に対処することが不可欠となる。

【０００５】

＊【発明が解決しようとする課題】一方、相互干渉力を補償し、指令の出力応答に見かけ上何の干渉もないよう制御する非干渉化制御の手法があり、これまで種々の手法が提案されてきている。しかし、これらは理論や構成が複雑であったり、正確なパラメータや計算精度を要することが多かった。さらに、ロバスト性を付加するために補償器を挿入すると、次数が増大し演算量を増すことになる。

【０００６】最近、マイクロプロセッサの速度は向上しているとはいえ、経済的理由などで実用上まだ演算量の多少は大きな問題である。そして、整数演算をさせることがほとんどであるため、演算誤差が外乱として制御系に影響を及ぼすことになる。

【０００７】本発明の目的は以上のような問題を解決する簡易かつ計算誤差や外乱にも強い実用的な多関節ロボットの非干渉化制御装置を提供することにある。

【０００８】

【課題を解決するための手段】本発明の多関節ロボット制御装置は、上記目的を達成するため、所定の位置指令信号に応じて所定の演算装置により算出された制御入力信号により多関節型ロボットを駆動制御し、該ロボットの角位置出力信号を検出するように構成され、前記演算装置は前記位置指令信号から角位置出力信号に至る伝達関数行列が干渉要素のない希望伝達関数行列となるように、所定の制御法則に基づいて前記制御入力信号を算出するようになっていることを要旨とする。

【０００９】

【作用】本発明では、外乱補償機能をインプリシットに状態（速度）オブザーバに含ませている。これにより、ロボットに入力するトルク指令とロボットの位置出力だけから、少ない制御器次数（すなわち少ない演算量）でロバスト性を保ちつつ制御目的を達成している。この場合、制御目的は多関節ロボットの非干渉化と各軸ごとの希望モデル（伝達関数）への極配置である。すなわち、単に制御器次数が少ないだけでなく、外乱補償、非干渉化及び極配置という三つの機能を１ステップで同時に達成する、極めてシンプルな設計法と制御アルゴリズムを提供することができる。

【００１０】

【実施例】一般にｎ軸の多関節型ロボットの運動方程式は次式のように表わせる。

【００１１】

＊

【数１】

$$M(\theta)\frac{d^2\theta}{dt^2}+D\left(\theta,\frac{d\theta}{dt}\right)\frac{d\theta}{dt}+f=Ku \qquad (1)$$

【００１２】ここで、Ｍ（　）はｎ×ｎ慣性行列、Ｄ（　）は粘性摩擦・コリオリ力・遠心力・逆起電力に関するｎ×ｎ行列で各々非対角要素が干渉項である。Ｋはモータ・ドライバ・駆動機構などのｎ×ｎの対角なゲイン行列、ｆはクーロン摩擦・重力を表わすｎ次元ベクトルである。またθ，$d\theta/dt$，$d^2\theta/dt^2$はそれぞれ軸角度、角速度、角加速度を表わし、ｕはドライバに印加されるｎ次元制御入力信号である。

【0013】実際の制御アルゴリズムは、マイクロプロセッサ上にソフトウエアとしてインプリメントされることを前提として、入力をＤＡコンバータで０次ホールドし、サンプリング時間τ_s（s）で離散化する。このようにして式（1）を離散系状態方程式で表わすと、

【0014】

【数2】

$$x(k)=A(\tau_s)\,x(k-1)+B(\tau_s)\{u(k-1)+\eta(k-1)\} \qquad (2)$$

$$y(k)=Cx(k) \qquad (3)$$

$$x^T(k)=\left[\theta^T,\ \left(\frac{d\theta}{dt}\right)^T\right]$$

$$A(\tau_s)=\exp\left(\begin{bmatrix}0 & I\\ 0 & -M^{-1}K\end{bmatrix}\tau_s\right)$$

$$B(\tau_s)=\int_0^{\tau_s}A(\tau_s-r)\begin{bmatrix}0\\ M^{-1}K\end{bmatrix}dr$$

$C=[I\ \ 0]$，　Iはn×n単位行列

【0015】ここで、η（k）はクーロン摩擦・重力等の定値外乱項である。もとの連続系には零点（伝達関数の分子多項式の根）はないが、このような離散化によって単位円近傍に零点をもつようになり、サンプリング時間を短くすると零点が単位円の外側にある非最小位相系となる。このことはまた後で扱うことにする。ここで後述する外乱補償機能により、式（2）の定値外乱η（k）は完全に補償されるためη項を除いて考え、式（2），（3）をｒｒｐ分解して進み演算子ｚ（時系列信号ｓ（ｋ）に対し、ｓ（ｋ＋1）＝ｚｓ（ｋ）となるような演算子）のｎ×ｎ多項式行列Ｐ（ｚ），Ｒ（ｚ）によって表わすと、

【0016】

【数3】

$$y(k)=R(z)P^{-1}(z)u(k) \qquad (4)$$

となる。この式（4）が制御対象の離散系伝達関数行列で、多変数系を扱う場合のひとつの表現方法である。

【0017】ここで以降の論議を簡便にするため、新たに演算子$\delta=z-1$を用いる。これにより制御対象の多項式行列を表わすと次のようになる。

【数4】

$$P(\delta)=I\delta^2+P_1\delta+P_0 \qquad (5)$$

$$R(\delta)=R_1\delta+R_0 \qquad (6)$$

ロボットの位置決め制御の場合、$P_0=0$であるが、P_1，R_1，R_0は対角要素のほかに非対角の０でない干渉要素がある。また、Ｒ（δ）は正則とする（逆行列が存在する）が、この仮定は通常のロボットでは成立する。

【0018】次に、外乱モデルを求める。式（2）でηを表わす外乱モデルは、各軸ごとに$\eta(t)=\eta_0+\eta_1 t+\cdots\cdots+\eta_d t^d$で表わされ、そのｚ変換を$\delta$で表わすと、

【数5】

$$\eta(\delta)=\eta_0/\delta+\cdots\cdots+\eta_d/\delta^{d+1} \qquad (7)$$

のように定義できる。ηは定値外乱であるからｄ＝０である。なお、η_1は未知である。

【0019】さて本発明の制御目的は、ロボットの動特性が非干渉化され、さらに各軸ごとの伝達関数が極配置され、希望伝達関数に一致することである。つまり、各軸ごとに伝達関数$m(\delta)=m_0/(\delta^2+m_1\delta+m_0)$となるように、指令ｖ（ｋ）からｙ（ｋ）に至る希望伝達関数行列を

【数6】

$$y(k)=N(\delta)M^{-1}(\delta)v(k) \qquad (8)$$

$M(\delta)=I(\delta^2+m_1\delta+m_0)$

$N(\delta)=Im_0$

と設定すれば、伝達行列が対角化され干渉要素が０となり、非干渉化されることになる。

【0020】次に、干渉要素をもった伝達関数行列で表わされる制御対象（式（4））に対し、位置指令ｖ（ｋ）からｙ（ｋ）に至る伝達関数行列を干渉要素のない対角な$N(\delta)M^{-1}(\delta)$に一致させる制御法則を求める。

【0021】まず、制御対象の軸ごとの次数（最大列次

数）が２、外乱の次数が$d+1=1$であるから、これらの次数により、任意の（２－１）＋（$d+1$）＝２次のモニック安定多項式を$q(\delta)=\delta^2+q_1\delta+q_0$とし、これを対角要素とするn×n多項式行列を

【数７】

$$Q(\delta)=Iq(\delta) \tag{9}$$

とする。このq（δ）がオブザーバの特性多項式となり、制御系の極配置モデルとは独立に設定できる。そして次式のような、Q（δ）の次数より１次低い１次のn×n多項式行列K（δ）、およびQ（δ）と同じ２次のn×n多項式行列H（δ）を考える。

【００２２】

【数８】

$$K(\delta)=K_1\delta+K_0 \tag{10}$$

$$H(\delta)=H_2\delta^2+H_1\delta+H_0 \tag{11}$$

最大列行次数が３次の任意の多項式行列F（δ）に対し、多項式方程式（１２）を満足する式（１０），（１１）のような多項式行列K（δ），H（δ）を係数比較により求める。

【００２３】

【数９】

$$K(\delta)P(\delta)+H(\delta)R(\delta)=F(\delta) \tag{12}$$

このとき、$K_i=Iq_i$，$i=0\sim d$とすることで、$\eta(k)$を漸近的に０とする外乱補償機能を制御法則に内包させ、定常偏差を生じさせなくすることができる。さらに、このようにK_i，$i=0\sim d$を選ぶことで、その他のK（δ），H（δ）の係数を唯一に決めることができる。さて式（１２）において、F（δ）を

【００２４】

【数１０】

$$F(\delta)=Q(\delta)\{P(\delta)-GM(\delta)N^{-1}(\delta)R_0\} \tag{13}$$

$G=N(\delta)R_0^{-1}$

【００２５】

としたとき、以下の制御法則

【数１１】

$$u(k)=Q^{-1}(\delta)\{K(\delta)u(k)+H(\delta)y(k)\}+Gv(k) \tag{14}$$

を考える。式（４），（１４）より

【００２６】

【数１２】

$$y(k)=R(\delta)\{Q(\delta)P(\delta)-K(\delta)P(\delta)-H(\delta)R(\delta)\}^{-1}Q(\delta)Gv(k) \tag{15}$$

【００２７】式（１５）に式（１２），（１３）を代入すると、

【数１３】

$$\begin{aligned} y(\delta)&=R(\delta)\{Q(\delta)GM(\delta)N^{-1}(\delta)R_0\}^{-1}Q(\delta)Gv(k)\\ &=R(\delta)R_0^{-1}N(\delta)M^{-1}(\delta)G^{-1}Q^{-1}(\delta)Q(\delta)Gv(k)\\ &=R(\delta)R_0^{-1}N(\delta)M^{-1}(\delta)v(k) \end{aligned} \tag{16}$$

式（１６）第２行目のQ（δ）は、その対角要素q（δ）を安定多項式に選んであるので、$Q^{-1}(\delta)Q(\delta)=I$というようにキャンセル可能である。

【００２８】ここでR（δ）は、ロボットを０次ホールドして、短いサンプリング時間で離散化したことによって、単位円近傍に零点をもつため、式（１６）において

【数１４】

$$\begin{aligned} R(\delta)R_0^{-1}&=R_1R_0^{-1}\delta+I\\ &\fallingdotseq I(0.5\delta+1)\\ &=I(z+1)/2 \end{aligned} \tag{17}$$

【００２９】という近似を行う。したがって、式（１７）を式（１６）に代入すると、

【数１５】

$$y(k)\fallingdotseq N(\delta)M^{-1}(\delta)(z+1)v(k)/2 \tag{18}$$

となって、新たに$v(k)=(z+1)v(k)/2$となるように規範入力を細工することで、非干渉化と極配置が同時に達成できる。

【００３０】図１は上述した式（１４）により規定される制御法則に基づく本発明の制御系全体の構成を示す。同図において、１は制御対象としての多関節型ロボット、２は演算装置、３は位置指令信号発生装置、４は駆動装置、５は角位置出力信号検出装置である。ロボット１の実際の伝達関数（離散系伝達関数行列）は$R(z)P^{-1}(z)$で、演算装置２は干渉要素をもった上記伝達関数の制御対象１に対し、干渉要素のない対角な$N(\delta)M^{-1}(\delta)$の希望伝達関数としての処理を可能とするため、前記式（１４）に基づく演算により位置指令信号v（k）に応じた最適な制御入力信号u（k）を出力する。なお、以上においてはn×nの多項式行列で説明したが、n＝１の場合でも本発明は成立する。

【0031】次に、図1の制御系の外乱応答特性の解析においては、規範入力を$v(k)=0$として、外乱$\eta(k)$から出力$y(k)$に至る伝達特性を調べる。まず、外乱$\eta(k)$は式（2）のように入力$u(k)$に加算された形で印加されるので、式（4）は、

【数16】

$$y(k)=R(\delta)P^{-1}(\delta)\{u(k)+\eta(k)\} \qquad (19)$$

となる。

【0032】式（12），（13），（14）および（19）より、

【数17】

$$y(k)=R(\delta)R_0^{-1}N(\delta)G^{-1}\{Q(\delta)-K(\delta)\}\times M^{-1}(\delta)Q^{-1}(\delta)\eta(k) \qquad (20)$$

【0033】この式で、定常応答、すなわち$k\to\infty$としたときの$y(k)$は、

【0034】

【数18】

$$\lim_{\delta\to 0}\delta[R(\delta)R_0^{-1}N(\delta)G^{-1}\{Q(\delta)-K(\delta)M^{-1}(\delta)Q^{-1}(\delta)]\eta(\delta) \qquad (21)$$

【0035】である。ここで、$\eta(\delta)=\eta'(\delta)/\delta^{d+1}$と表わせる。また、$K_i=Iq_i$，$i=0\sim d$のように選んであるから、$Q(\delta)-K(\delta)=\delta^{d+1}\{Q'(\delta)-K'(\delta)\}$と表わせ、$\eta(\delta)$の分母$\delta^{d+1}$がキャンセルされる。したがって式（21）は、

【0036】

【数19】

$$\lim_{\delta\to 0}\delta[R(\delta)R_0^{-1}N(\delta)G^{-1}\{Q'(\delta)-K'(\delta)M^{-1}(\delta)Q^{-1}(\delta)]\delta\eta'(\delta) \qquad (22)$$

【0037】となり、ここで、分母行列$M^{-1}(\delta)Q^{-1}(\delta)$は安定に選んであるから、式（22）の値は0になる。すなわち、$k\to\infty$のとき外乱$\eta(\delta)$の出力への影響は0に収束する。したがって、この系は式（7）のような外乱ベクトル$\eta(\delta)$に対して定常偏差を生じない。

【0038】図2は図1の制御系に基づく本発明の多関節ロボット制御装置の一実施例で、多関節型ロボット1は、例えば、スカラ型ロボットが用いられ、このロボットの制御軸数は4軸であるが、主に干渉のある水平2リンク機構を構成するθ_1軸（第1軸）とθ_2軸（第2軸）に本発明の制御方式を適用する。演算装置2としては、例えばディジタル信号処理装置（DSP）が用いられ、この装置による演算制御のため$P(z)$等は下記のようにして定める。すなわち、制御対象1のパラメータは、駆動装置4を含めて行った最小自乗法によるパラメータ同定試験により得られ、

【0039】

【数20】

$$P(z)=\begin{bmatrix} z^2-1.998z+0.998 & -0.0017z+0.0017 \\ -0.0013z+0.0013 & z^2-1.994z+0.994 \end{bmatrix}$$

$$R(z)=\begin{bmatrix} 0.00033z+0.00033 & -0.00023z-0.00024 \\ -0.00039z-0.00038 & 0.00168z+0.00167 \end{bmatrix}$$

【0040】である。希望モデルの二つの極は20rad／sおよび800rad／s、オブザーバは2次のバタワース極120rad／sに設定した。制御法則（式（14））のパラメータは、以下のようになる。

【0041】

【数21】

$$K(z)=\begin{bmatrix} -0.4949z+0.5077 & 0.00023z-0.00023 \\ -0.0010z+0.0010 & -0.49244z+0.50523 \end{bmatrix}$$

$$H(z)=\begin{bmatrix} -266.2z^2+514.7z-248.8 & -37.6z^2+72.8z-35.2 \\ -62.6z^2+121.2z-58.6 & -51.6z^2+99.7z-48.2 \end{bmatrix}$$

$$q(z)=z^2-1.774z+0.787$$

$$G=\begin{bmatrix} 19.83 & 2.78 \\ 4.58 & 3.89 \end{bmatrix}$$

【0042】図3（b）は同図（a）のようにロボット1のθ_1軸のみ動作させた時の、位置指令信号v（k）に対する実位置の偏差をプロットしたもので、点線は従来方式、実際は本発明の方式による結果を示す。同図から明らかなように、非干渉化を行わない従来の各軸サーボ制御方式の場合、干渉力が高減速でかなり小さくなっているにもかかわらず、0指令のはずのθ_2軸は大きく振れているが、本発明の方式により非干渉化制御した場合、θ_2軸はほとんど振れず、干渉力の影響が十分に補償されているのがわかる。

【0043】また、図4（b）は図3と同様にして図4（a）のようにθ_2軸のみ動作させた結果を示す。この場合は、両方式のどちらも干渉による影響は少なく、非動作軸のθ_1軸の振れは小さい。しかし明らかに本発明の非干渉化制御した方が振れが少なく、特性は良好であることがわかる。

【0044】更に、図5（b）は同図（a）のようにθ_1，θ_2の両軸を同時に動作させたときの位置偏差の時間応答特性を示す。同図から明らかなように、従来方式の非干渉化をしない場合、減速・停止時に大きな動作の乱れが生じ、それによってタクトが遅れるが、本発明方式の非干渉化制御した場合は、動作の乱れも小さく、タクト遅れもなくなっていることがわかる。

【0045】

【発明の効果】以上説明したように本発明によれば、外乱補償機能をオブザーバに含ませることで、多関節ロボットのロバストな非干渉化および極配置を同時に達成する制御アルゴリズムをシンプルに構成できる。このアルゴリズムは多変数系を扱って、さらに外乱補償機能をも＊

＊っているにもかかわらず、演算量が非常に少ない。例えばパラメータを最小にすると、スカラ型ロボット２軸分で、積和演算が約２０回である。さらに、制御パラメータの計算（パラメータ設計）も、多項式の係数比較をする程度で、外乱補償、非干渉化および極配置のすべてを同時に達成するパラメータが得られる。したがってＣＡＤ化も容易であり、非常に実用的である。また、スカラ型ロボットによる実施例では、駆動機構が高減速比であるにもかかわらず、従来行われてきた各軸ごとのサーボ系に比べ、停止時のオーバーシュートはなくなり、これによってタクトも短縮され、その有効性は明らかである。

【図面の簡単な説明】

【図１】本発明の制御系の全体構成を示すブロック図である。

【図２】本発明の一実施例を示すブロック図である。

【図３】ロボットのθ_1軸のみ動作させた時の位置指令信号に対する実位置の偏差を示す特性図である。

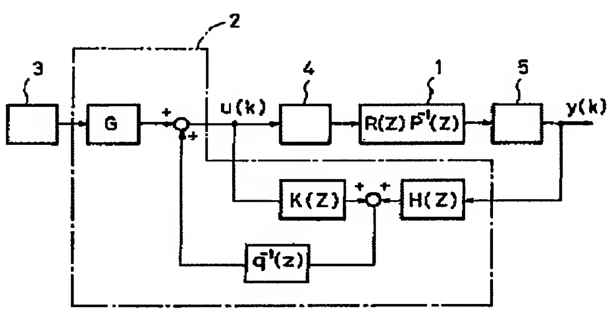
【図４】θ_2軸のみ動作させた時の図３と同様の特性図である。

【図５】θ_1，θ_2両軸を同時に動作させたときの位置偏差の時間応答特性図である。

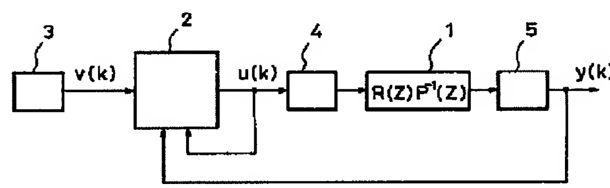
【符号の説明】

1　ロボット
2　演算装置
3　位置指令信号発生装置
4　駆動装置
5　角位置出力信号検出装置

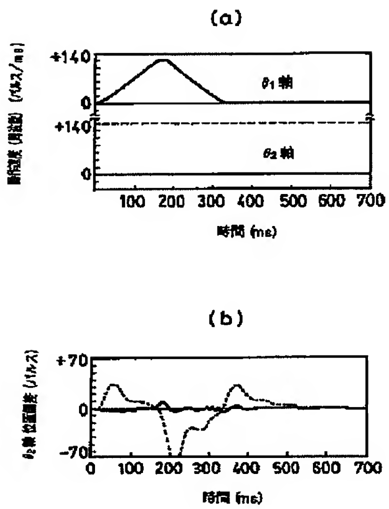
【図１】



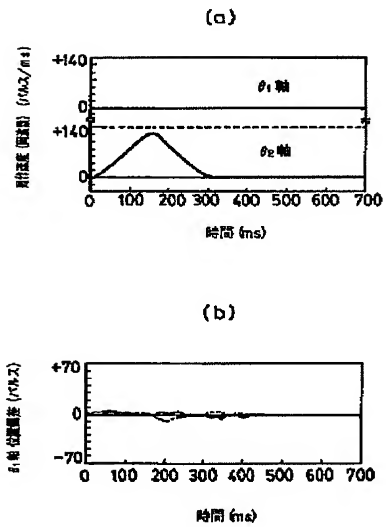
【図２】



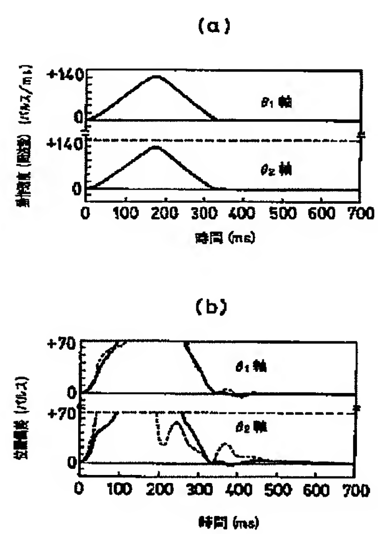
【図3】


(a)
+140
0
+140
0
θ_1軸
θ_2軸
100 200 300 400 500 600 700
時間 (ms)
(b)
+70
0
-70
0 100 200 300 400 500 600 700
時間 (ms)

【図4】


(a)
+140
0
+140
0
θ_1軸
θ_2軸
0 100 200 300 400 500 600 700
時間 (ms)
(b)
+70
0
-70
0 100 200 300 400 500 600 700
時間 (ms)

【図5】


(a)
+140
0
+140
0
θ_1軸
θ_2軸
0 100 200 300 400 500 600 700
時間 (ms)
(b)
+70
0
+70
0
θ_1軸
θ_2軸
0 100 200 300 400 500 600 700
時間 (ms)